

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

040507

土石流的流動之謎

學校名稱：國立中興高級中學

作者：	指導老師：
高二 鄧晴安	林淑芳
高二 鄭開元	黃雋昌
高二 林佳穎	
高二 洪琴惠	

關鍵詞：土石流 顆粒流 破壞力

摘要

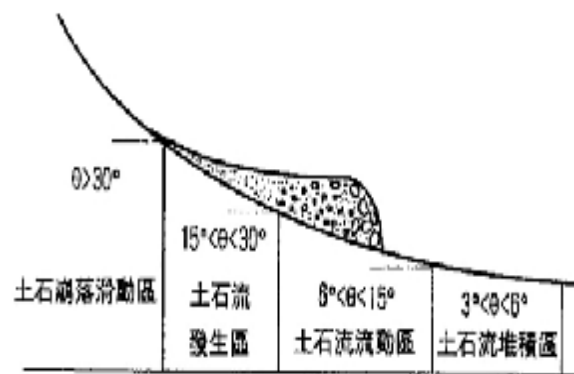
土石流對南投山區居民是個夢魘。本主旨在探討土石流中不同粒徑粒石的流動現象、破壞範圍、與分佈形狀，及渠道長度、含水量、含泥量多寡對其影響與成因。研究中以堆積遠近表破壞力強弱。大粒徑隨流動而上升至土石混合體上方，小粒徑下降成為軸承；當混合體含水量越高，現象越顯著。流動渠道越長時，大石跳上混合體的高度越高，堆積距渠道出口越遠，大、小石的差距越大，表破壞力越懸殊；堆積形狀呈放射扇形。

不同粒石在個別、混合、加水、加水與高領土的實驗設計中，其顆粒分布的改變，與力及能量交互作用有關，而受固體對剪切力的分散程度比水來得大的因素影響甚巨。土石流流動中，地質材料互撞，粒徑越大，剪切力與分散力越大，易集中於堆積表面與前端，且此運動過程，處持續變形狀態。顆粒流的特性在整治時應列為重要考量。

壹、研究動機

台灣為多山島嶼，約四分之三屬於山坡地，地勢陡峻，地質破碎，河短流急，不良的地質條件，加上豪雨頻仍，十分容易引發沖蝕與山崩，導致土石災害。加上台灣近數十年來的快速發展使得許多河流排水空間受到開發利用，以致現有的防洪排水設施的保護不足，而造成氾濫成災。民國七十年以來，更因山地河丘陵土地的開發，即使土石流危險區也難免被利用，因而土石流也成為倍受矚目的重大自然災害。

豪雨成災，誘發土石流，是自古有的現象。南投大部分面積皆山區，因過度開發山地與道路，所以當天災的侵襲，不免將山坡上的土石冲刷下來——土石流。自1996年七月三十一日至八月一日，強烈颱風賀伯襲捲台灣，其降雨量及強度為歷年來所罕見，賀伯在全台造成很大的災情，以阿里山地區與南投山區一帶最大，自此「土石流」便在台灣打響名號。土石流流動快速，破壞力強，以南投信義鄉的神木村為例，時常在豪雨過後發生土石流，而就讀學校裡一些住在南投山區的同學也常因豪雨後的土石流而阻斷交通，不能順利往返；另外，在高一基礎地球科學的「山崩與土石流」的章節中，也概述土石流的形成與對台灣山區的可怕破壞，更引發居住在南投的我們想正視這個可怕夢魘的動機；所以，對土石流的產生、流動做深入了解，有助於提供防治土石流的參考。



貳、研究目的

本主旨在探討土石流中不同粒徑粒石的流動現象、破壞範圍、與分佈形狀，及渠道長度、含水量、含泥量多寡對其影響與成因。待答的問題有四：

- 一、探討土石流流動時，個別乾燥礫石與混合時，礫石粒徑大小與破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因。
- 二、探討土石流流動斜坡路徑長 L 對土石流破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因。
- 三、探討土石流流動時，含水量的多寡對土石流破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因。
- 四、探討土石流過程中，礫石加水與泥的混合體中各種成分與不同粒徑礫石分佈的變化及成因。

參、研究設備及器材

- 一、壓克力渠道 (長 3.0m、寬 0.15m、深 0.2m)
- 二、壓克力平板 (1.30m*1.30m)
- 三、塑膠平板 (1.30m*1.30m)
- 四、大理石碎石 (粒徑分別為 0.7cm、1.0cm、2.0cm、3.0cm、5.0cm 五種)
- 五、高嶺土 (平均粒徑 $<5\mu\text{m}$ ，一包)
- 六、水
- 七、電子秤 (準確至 0.001g，二個)
- 八、玻璃杯 (五個)
- 九、塑膠盒 (五個)
- 十、塑膠大圓筒 (二個)
- 十一、染料 (紅色、藍色油性噴漆各一瓶)
- 十二、高速攝影機 (一組)



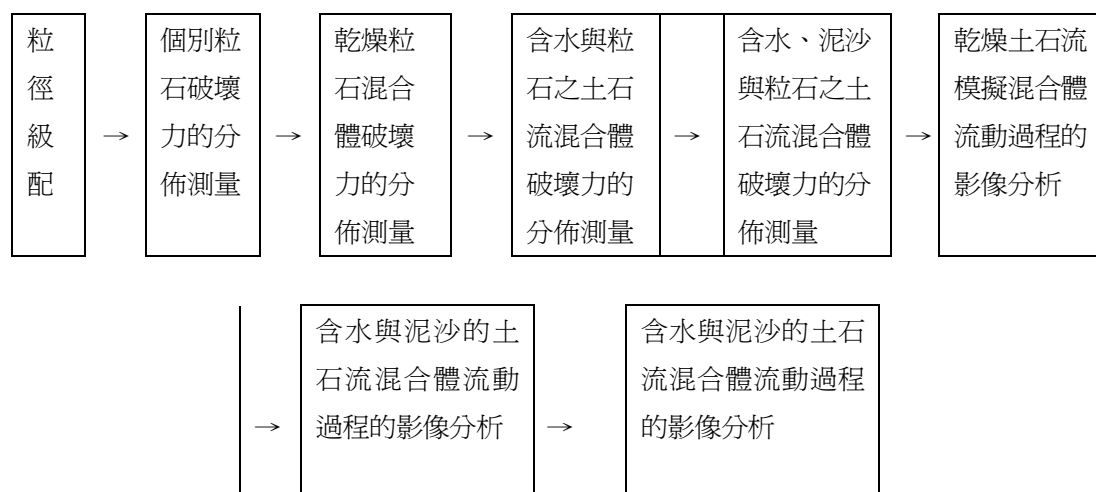
渠道照片

肆、研究過程或方法

所謂土石流(debris flow)，乃係指泥、砂、礫及據實等固態物質與水之混合物受重力作用所產生的流動現象，它為開發坡地之土沙災害，是一種含有高濃度的災害性急流，具有大量土砂礫石集中並有一成隆起之先端部，衝蝕力強，遇阻礙不擾流而直接撞擊，破壞力極大。

因土石流是極危險的天然災害，所以要研究其動態過程顆粒分布變化，幾乎是不可能的。唯有提出假說，將範圍縮小或以模擬的方式進行實驗，探討圍觀過程，才能在安全的環境下提出可能令人信服的結果與結論。

本研究的土石流與渠道採模擬實驗，將經人工壓碎的大理岩碎石平均粒徑為 0.7cm、1.0cm、2.0cm、3.0cm、5.0cm 的五種粒石經加水與高嶺土之混合體模擬真實的土石流，自製一壓克力渠道(長 3.0m、寬 0.15m、深 0.2m)模擬土石流的天然渠道。為了探討待答問題，本研究流程主要有八個步驟，如流程圖所示：



其詳細過程分述如下：

一、粒徑級配

- (一)、在土石流相關學術研究實驗中，常見應用統計上常態分佈的機率概念，即將實驗土砂的各種粒徑依照常態分佈，分別配予其相對應之重量，使混合後的土砂成為各種粒徑呈現常態分佈的混合體。
- (二)、考慮土石流災害中，最嚴重且直接的災害為其中巨石的撞擊與破壞力，且為了凸顯實驗中較大顆粒砂石的運動與堆積特性，故並非採用常態分佈的粒徑級配，而增加較大顆粒之砂粒含量。本研究以電子秤分別測量出五種粒徑砂粒的重量並混合之，其中粒徑 0.7cm 為 0.2kg、粒徑 1.0cm 為 1.36kg、粒徑 2.0cm 為 2kg、粒徑 3.0cm 為 2.64kg、粒徑 5.0cm 為 3.8kg。
- (三)、依土石流相關學術研究所述，土石流中一般至少含泥 10%，為簡化實驗，本研究即使用含泥量 10% 作為調配，故加入質量 1kg 的高嶺土作為土石流中的泥與黏土。
- (四)、在砂石與黏土中加入適量的水並攪拌至混合均勻，直至土石流模擬體可以在渠道中滑下，且含水量適中使下游平板的堆積體不致因含水量過高而無法堆積，以供測量與分析的程度為止，並紀錄下所加入的水量。

二、個別礫石破壞力的分佈測量

本研究以礫石堆積的遠近來測量各種粒徑礫石破壞力的分佈，因當礫石堆積越遠時，表示該礫石具有越強的破壞力。

- (一)、將五種不同粒徑的礫石分別自坡度 30 度的軌道長 1.0m、坡度 30 度軌道長 2.0m 的坡道倒下，使其流動，待其堆積在(1.30m*1.30m)壓克力平板座標格上後，觀察並紀錄其沉積的粒徑的排列。

- (二)、觀察並繪出其散佈石粒的分佈範圍與形狀，。
- (三)、使用電子秤秤出各礫石在單位座標格中的重量，統計重量分布後，製成立體圖。探討土石流中各種粒徑乾燥時個別的破壞力。

三、乾燥礫石混合體破壞力的分佈測量

將全數五種大理石粒在塑膠拌桶中充分混合，再分別從 30 度軌道長 1.0m、30 度軌道長 2.0m 的坡道滾下，重複上述二中的三項步驟，探討土石流乾燥混合體中各種粒徑的破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因。

四、含水與礫石混合體破壞力的分佈測量

將全數的五種大理石粒在塑膠拌桶中充分混合，加入可以使其流動的水後(總重約 11kg)，分別從 30 度軌道長 1.0m、30 度軌道長 2.0m 的坡道滾下，重複上述二中的三項步驟，探討含水與礫石的土石流混合體中各種粒徑礫石的破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因。

五、含水、泥沙與礫石之土石流混合體破壞力的分佈測量

將全數的五種大理石粒在塑膠拌桶中充分混合，加入 1.0kg 的高嶺土和可以使其流動的水後(總重約 11kg)，分別從 30 度軌道長 1.0m、30 度軌道長 2.0m 的坡道滾下，重複上述二中的三項步驟，探討含水、泥沙與礫石的土石流混合體中各種粒徑礫石的破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因。

六、乾燥土石流模擬混合體流動過程的影像分析

將全數的五種大理石粒在塑膠拌桶充分混合(總重 10kg)，從 30 度軌道長 2.0m 的坡道滾下，用高速攝影機(400 張/秒)拍下後，分析乾燥混合體流動時其

七、含水與泥沙的土石流混合體流動過程的影像分析

將含水與泥沙的土石流混合體(總重 12kg)，從 30 度軌道長 2.0m 的坡道滾下，用高速攝影機(400 張/秒)拍下後，分析流動時粒徑排列分布的變化情況。

伍、研究結果

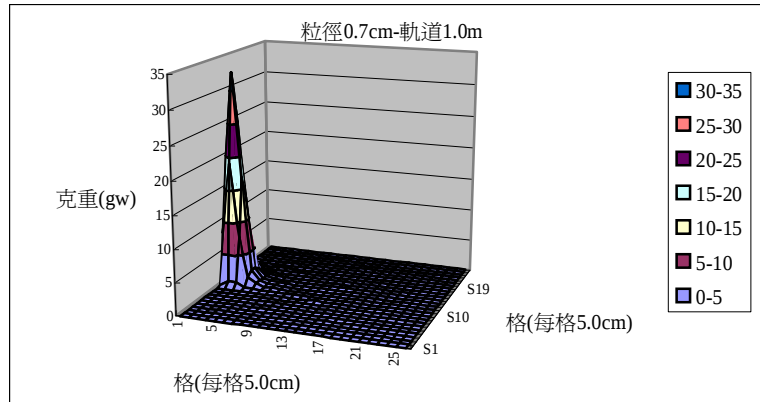
本研究結果以六個實驗分述之：

一、實驗一：個別礫石破壞力的分佈測量

(一)、坡度：30 度 軌道長：1.0m 水：無 高嶺土：無

1. 粒徑 0.7cm：

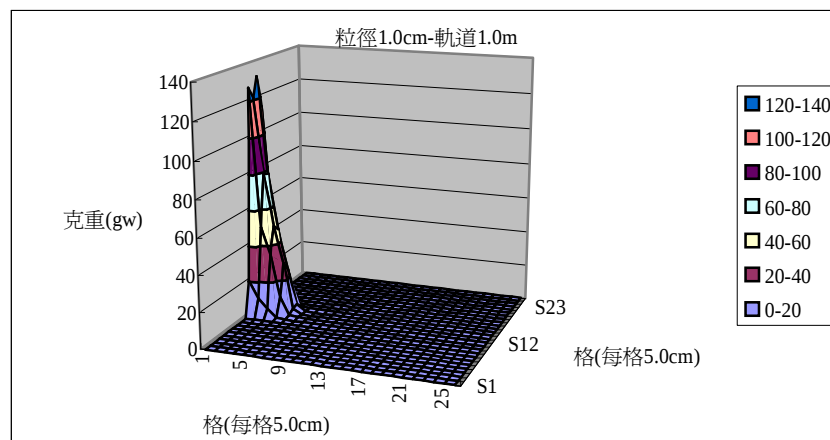
礫石堆積重量大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(12,2)、(15,2)、(13,4)、(14,4)，所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。



圖(一) 粒徑 0.7cm-軌道 1.0m 重量分布的立體圖(左方為出口)

2. 粒徑 1.0cm :

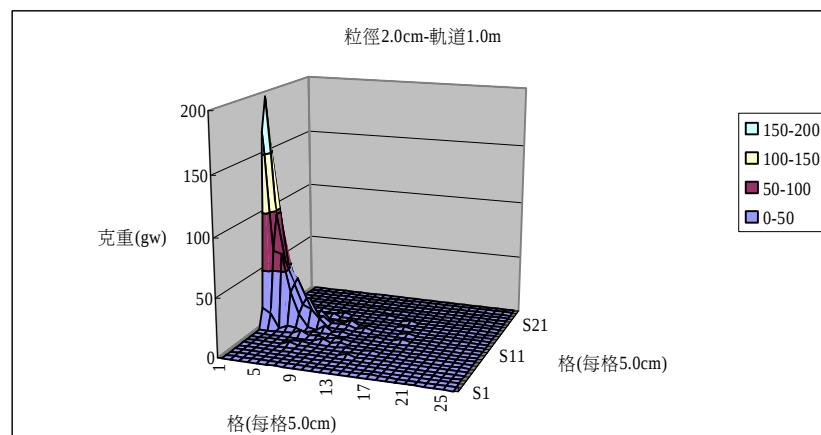
礫石堆積重量集中在座標格(13,1)、(14,1)、(11,2)、(16,2)、(13,5)、(14,5)，所圍整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。軌道上有礫石堆積，重量 238.419g。



圖(二) 粒徑 1.0cm-軌道 1.0m 重量分布立體圖(左方為出口)

3. 粒徑 2.0cm :

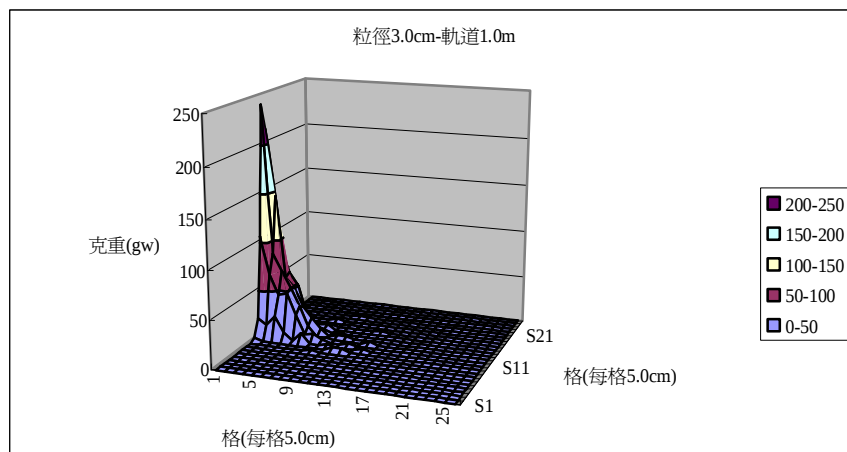
礫石堆積重量集中在座標格(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,7)、(14,7)，所圍整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。軌道上有礫石堆積，重 374.115g。



圖(三) 粒徑 2.0cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

4. 粒徑 3.0cm：

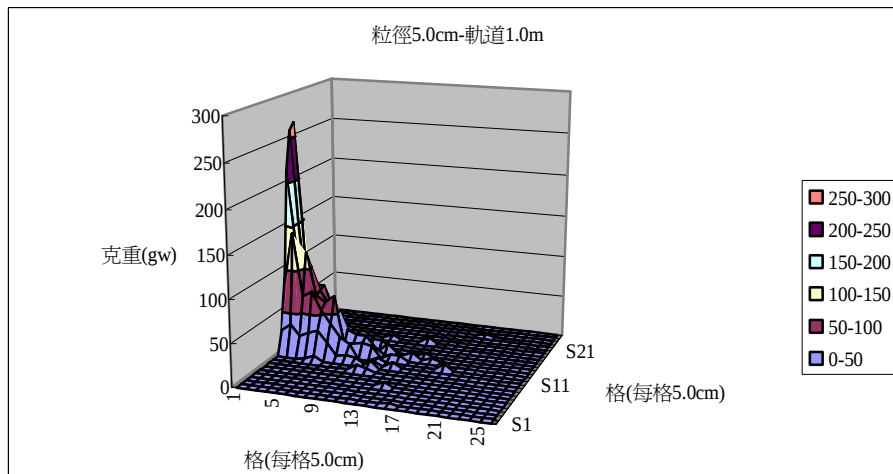
礫石堆積重量大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,7)、(14,7)，所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。且在軌道上有礫石堆積，重量 563.161.g



圖(四) 粒徑 3.0cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

5. 粒徑 5.0cm：

礫石堆積重量大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,9)、(14,9)，所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。且在軌道上有礫石堆積，重量 668.635g

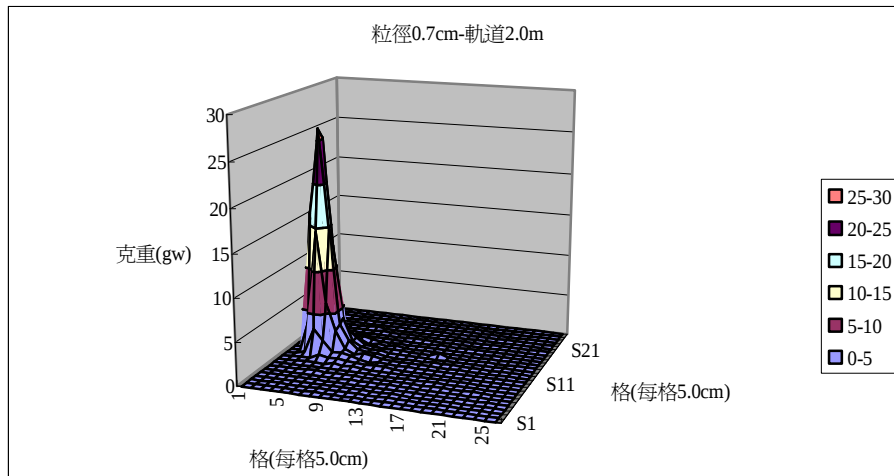


圖(五) 粒徑 5.0cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

(二)、坡度：30 度 軌道長：2.0m 水：無 高嶺土：無

1. 粒徑 0.7cm：

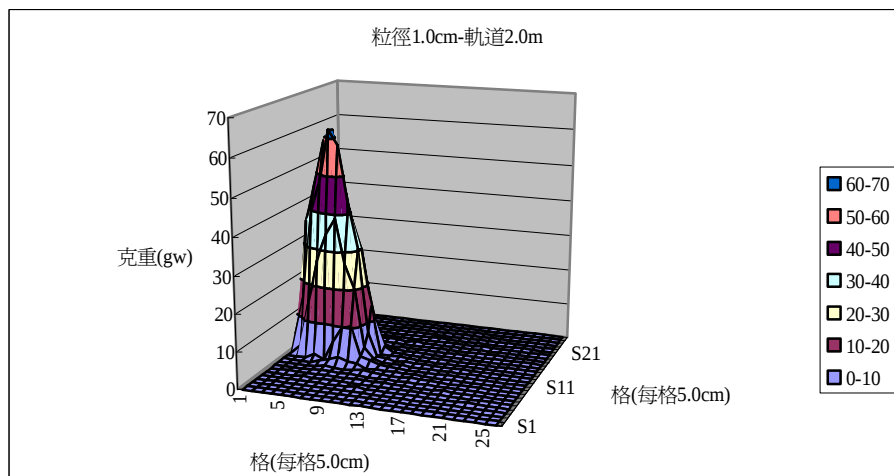
礫石堆積重量大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(11,2)、(15,2)、(13,4)、(14,4)，所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。



圖(六) 粒徑 0.7cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

2. 粒徑 1.0cm：

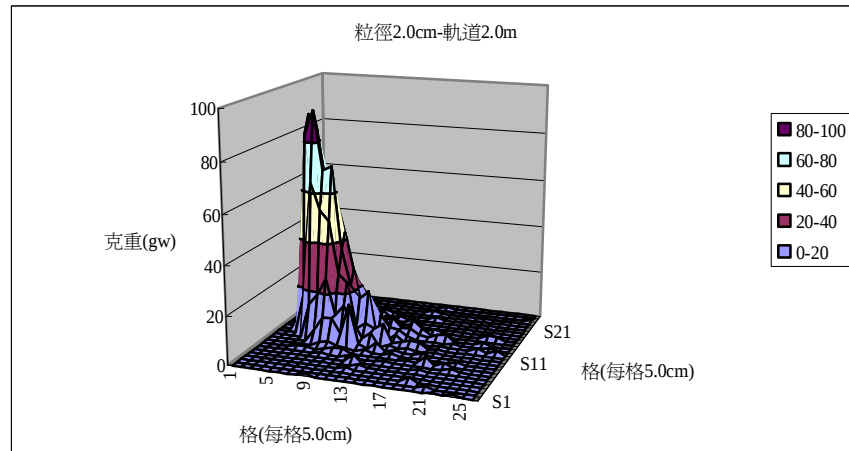
礫石堆積重量大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(10,3)、(16,3)、(13,6)、(14,6)，所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。



圖(七) 粒徑 1.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

3. 粒徑 2.0cm：

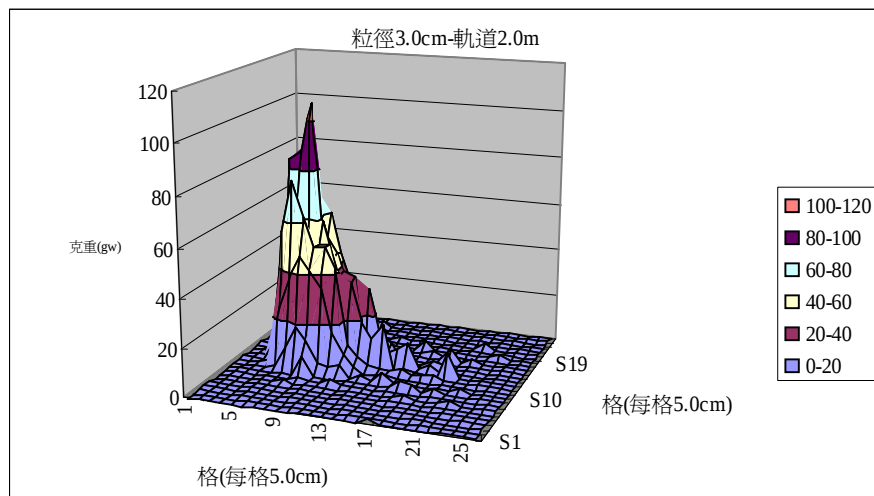
礫石堆積重量大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(10,3)、(16,3)、(13,8)、(14,8)，所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。



圖(八) 粒徑 2.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

4. 粒徑 3.0cm：

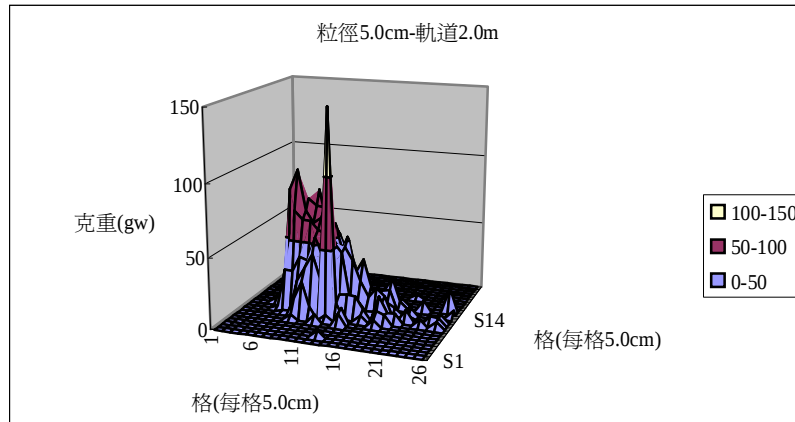
礫石堆積重量大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(11,3)、(16,3)、(13,7)、(14,7))，所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。



圖(九) 粒徑 3.0m-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

5. 粒徑 5.0cm：

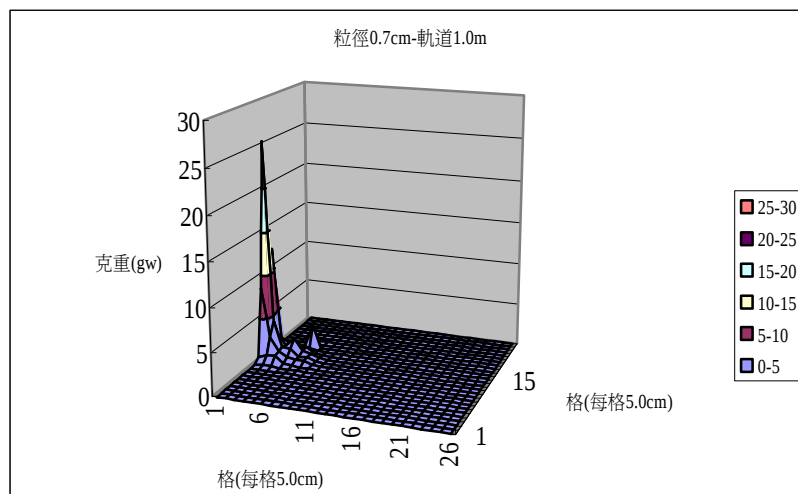
礫石堆積大多集中在座標格(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,8)、(14,8)其圍成所圍成之面積，整體形狀(破壞範圍)呈放射狀扇形。



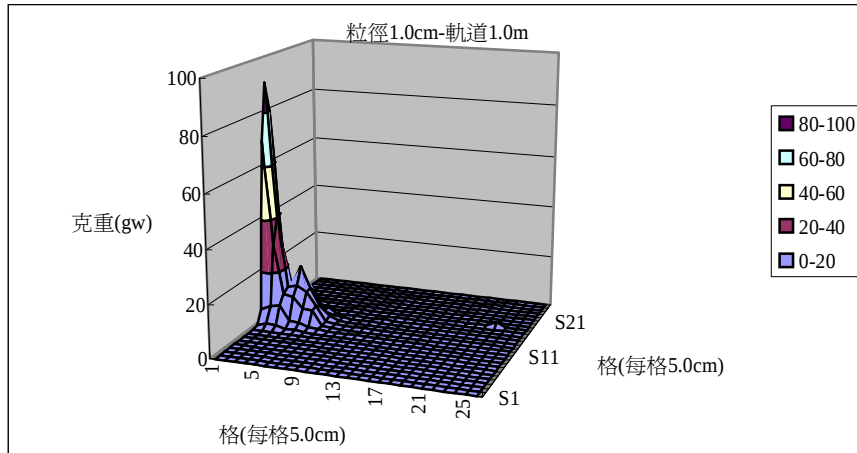
圖(十) 粒徑 5.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

二、實驗二：乾燥礫石混合體破壞力的分佈測量

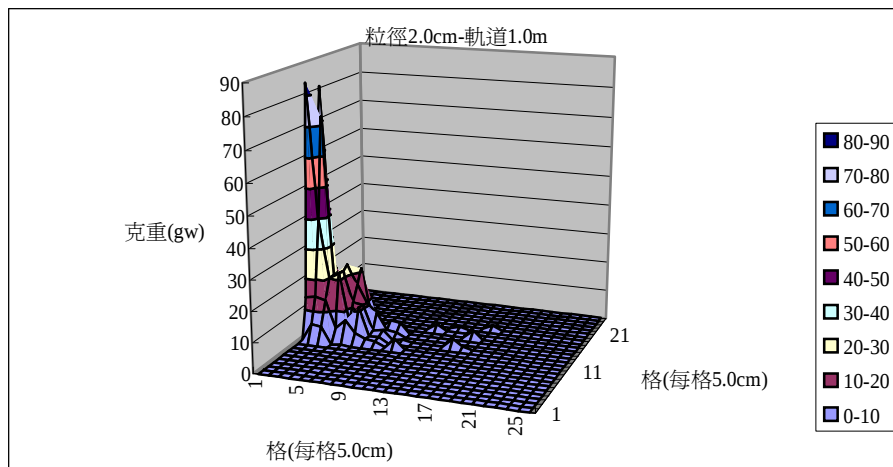
(一)、全部混合(總重 10kg)，軌道長：1.0m，高嶺土：無，水：無



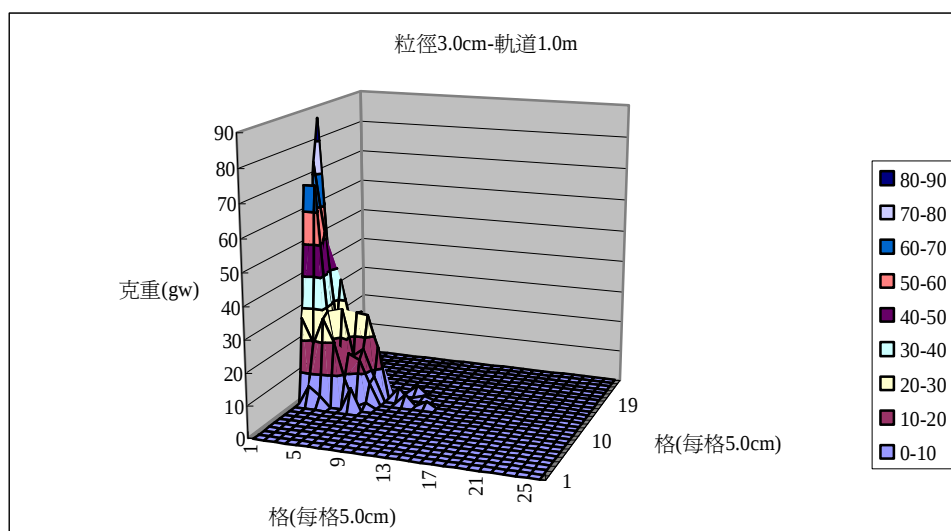
(圖十一) 粒徑 0.7cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



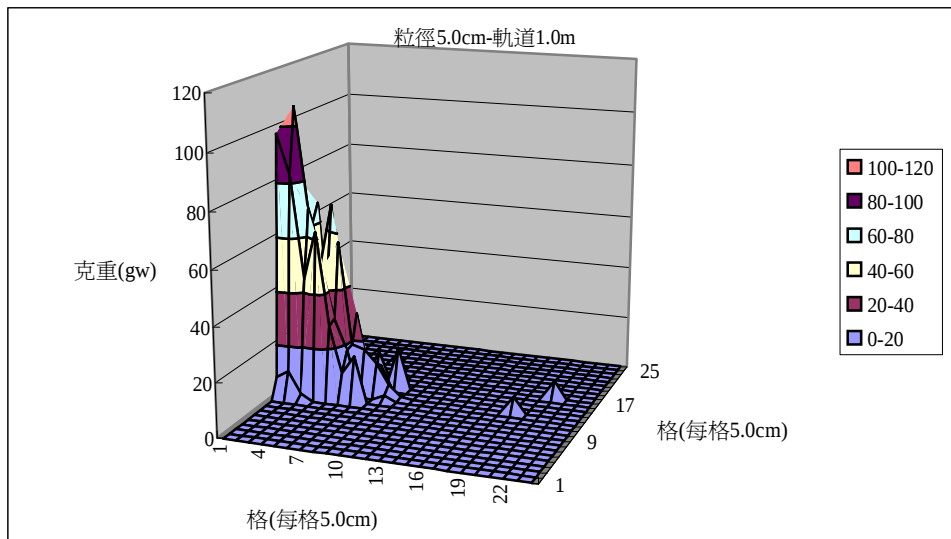
(圖十二) 粒徑 1.0cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖十三) 粒徑 2.0cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖十四) 粒徑 3.0cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖十五) 粒徑 5.0cm-軌道 1.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

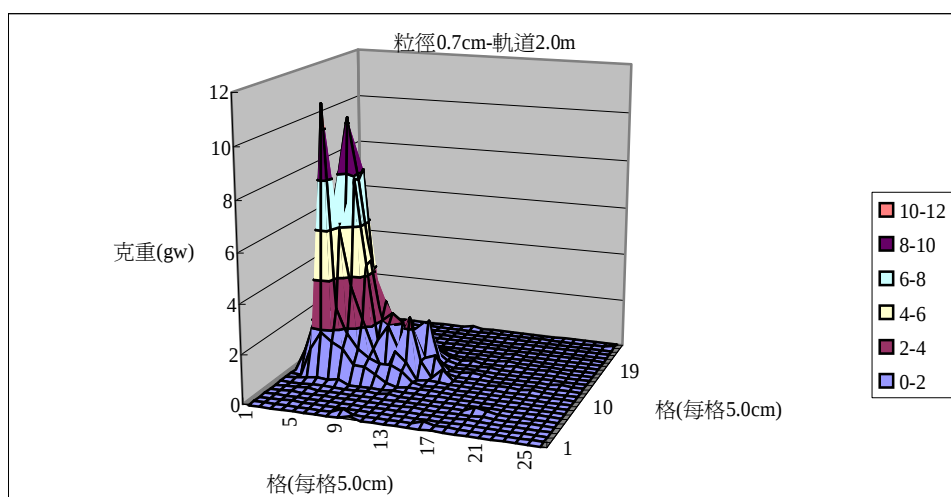


全部混合-軌道 1.0m(不加水和高嶺土)

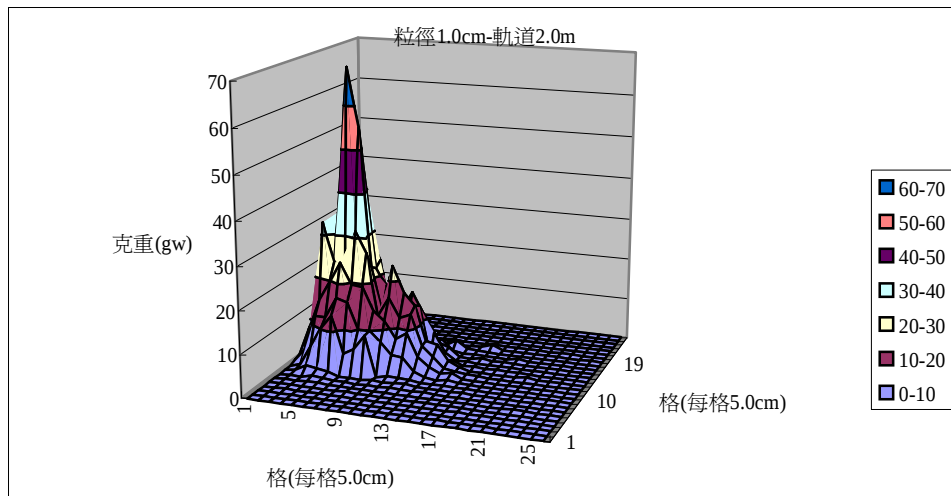


全部混合-軌道 1.0m(不加水和高嶺土)

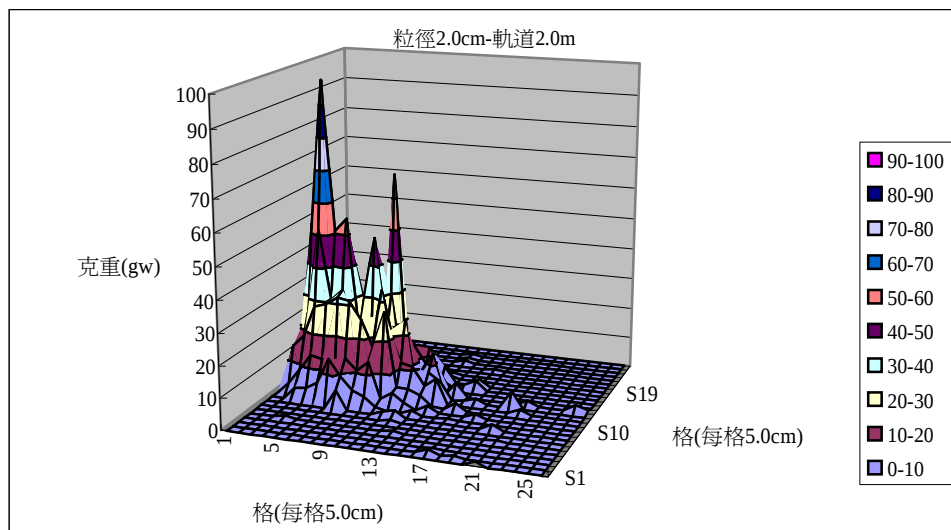
(二).全部混合(總重 10kg)：軌道長：2.0m，高嶺土：無，水：無



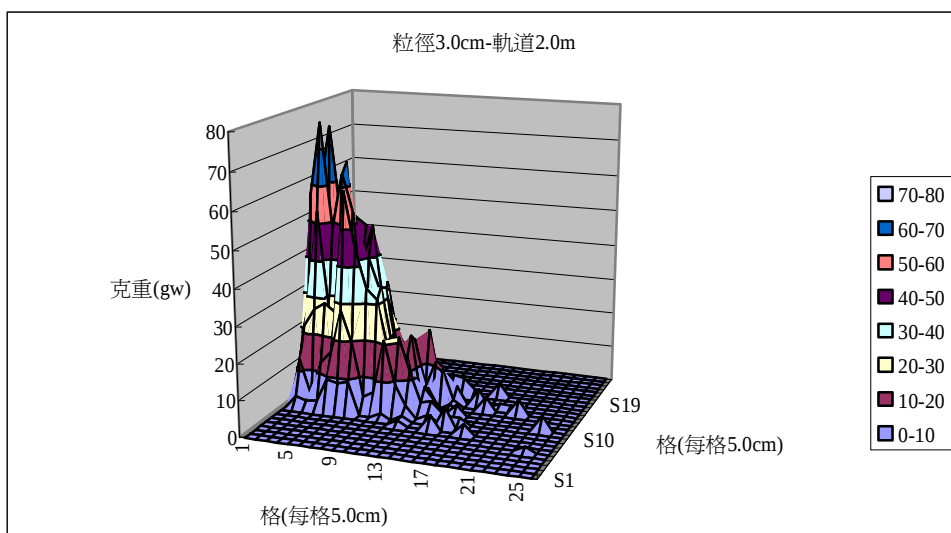
(圖十六) 粒徑 0.7cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



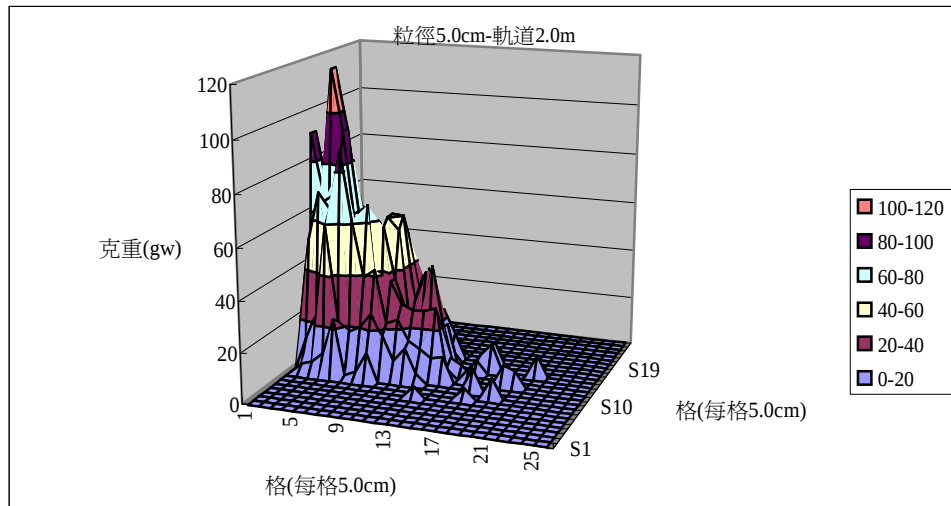
(圖十七) 粒徑 1.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖十八) 粒徑 2.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖十九) 粒徑 3.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



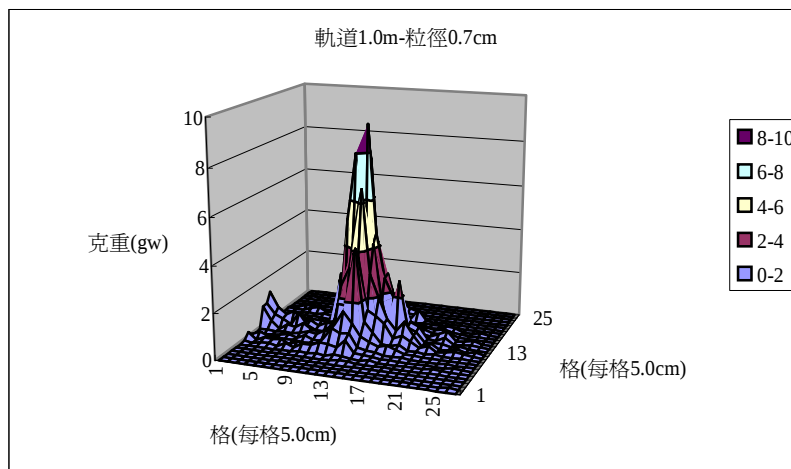
(圖二十) 粒徑 5.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

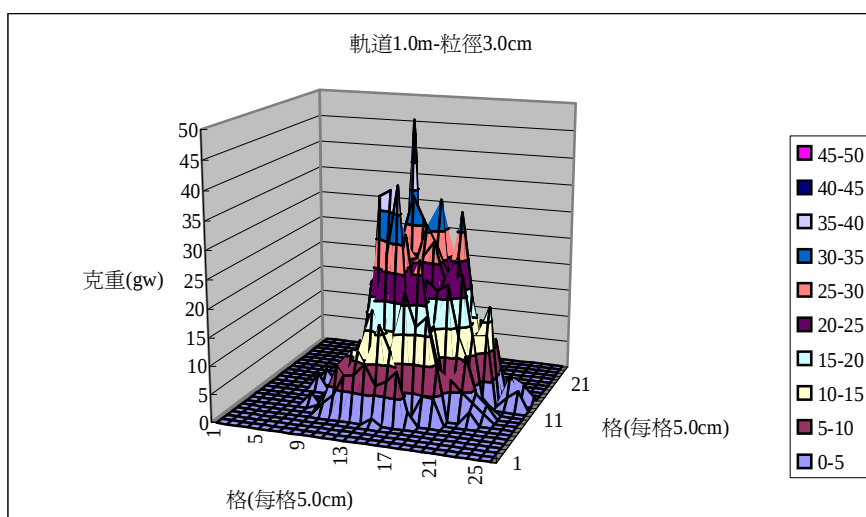
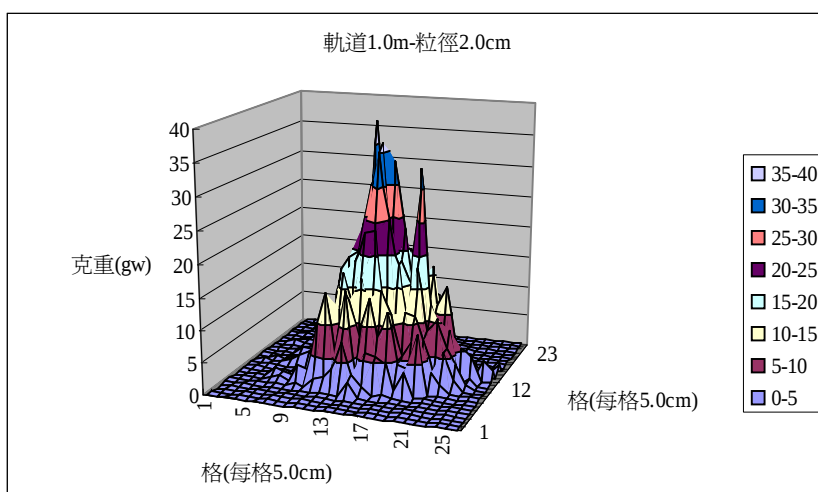
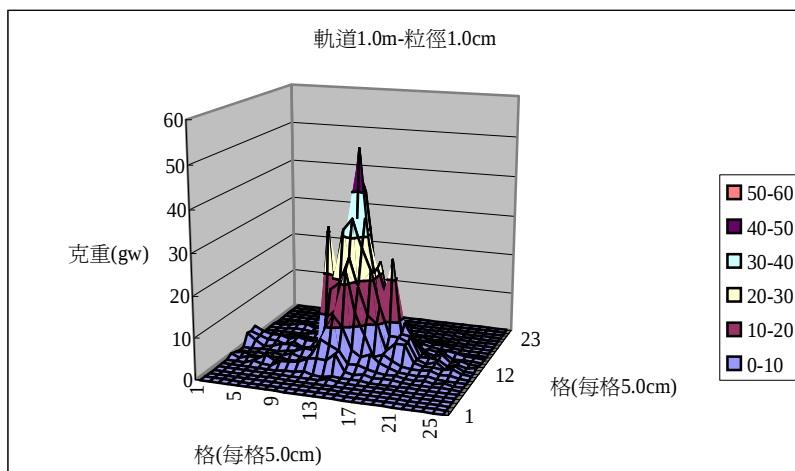


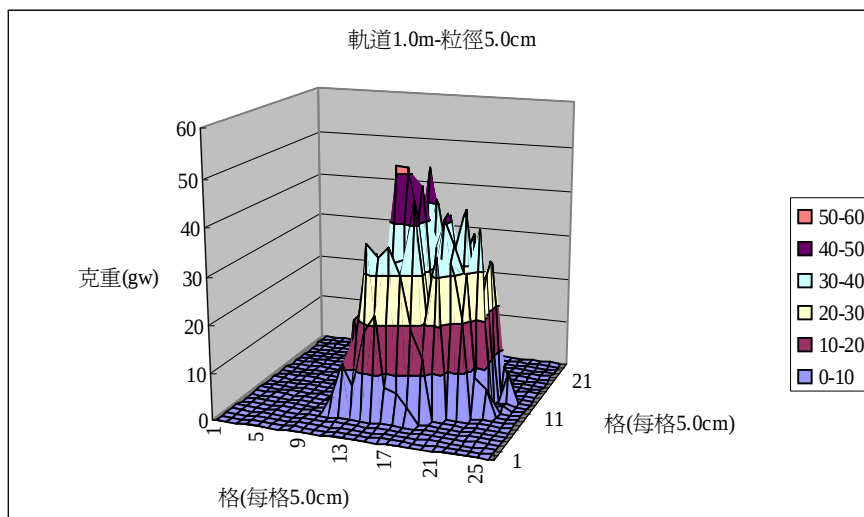
混合 2.0m 不加高嶺土和水 照片

三、實驗三：含水之礫石混合體破壞力的分佈測量

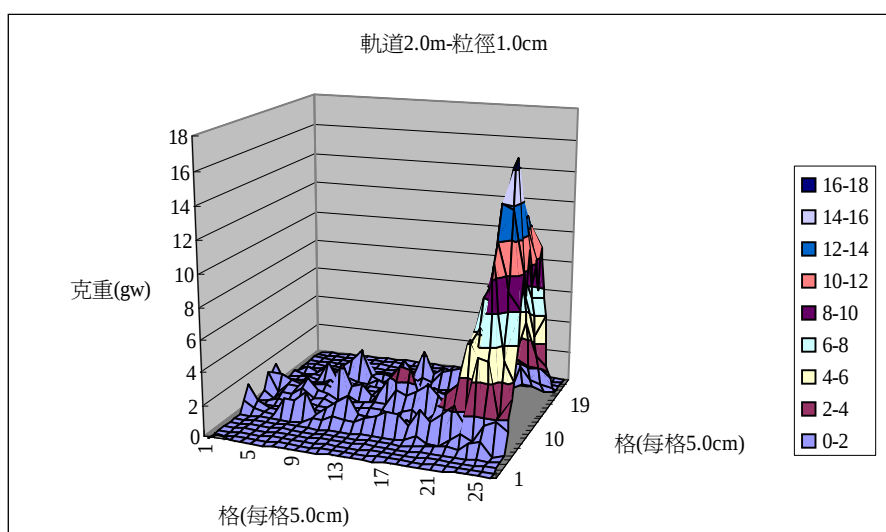
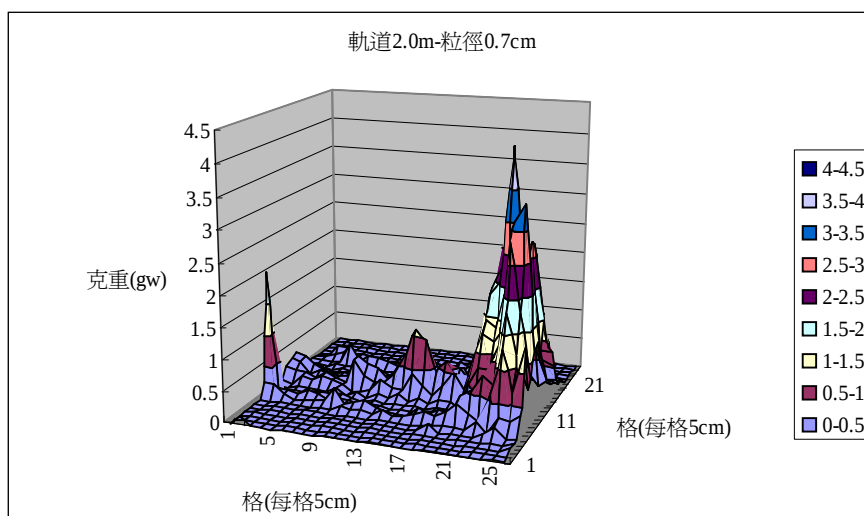
(一)、五種礫石混合：軌道長：1.0m、1.0kg 水

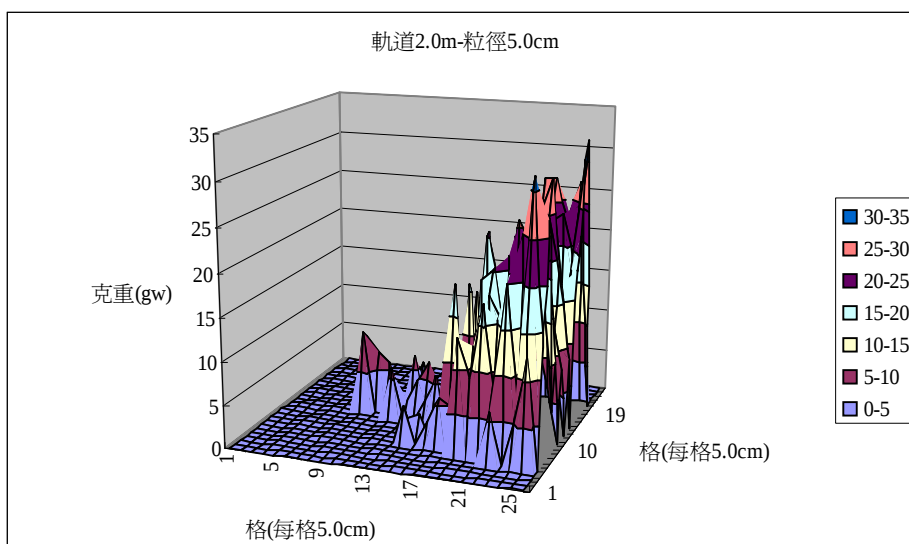
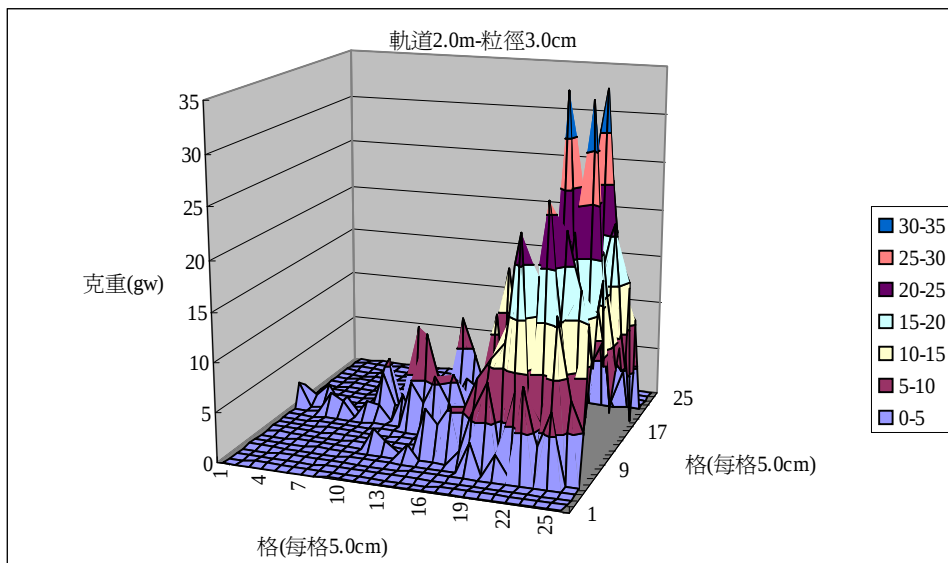
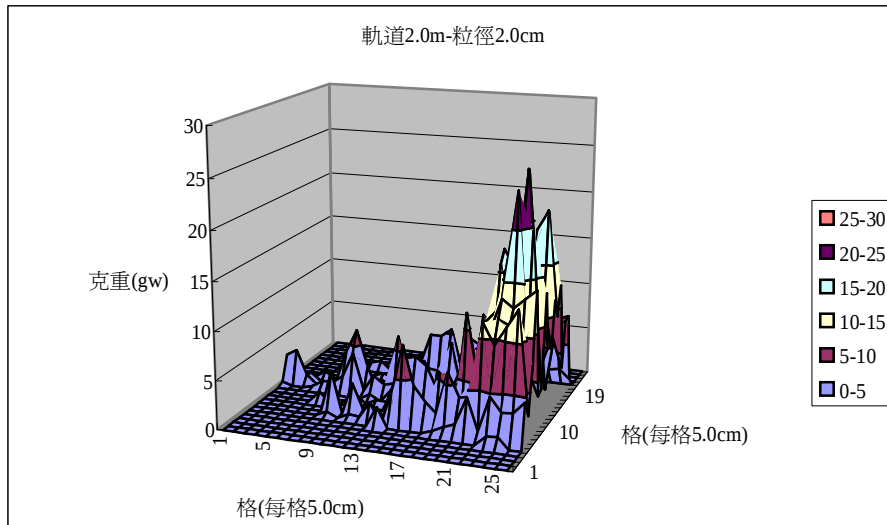






(二)、五種礫石混合：軌道長：2.0m、高嶺土：1.0kg、水

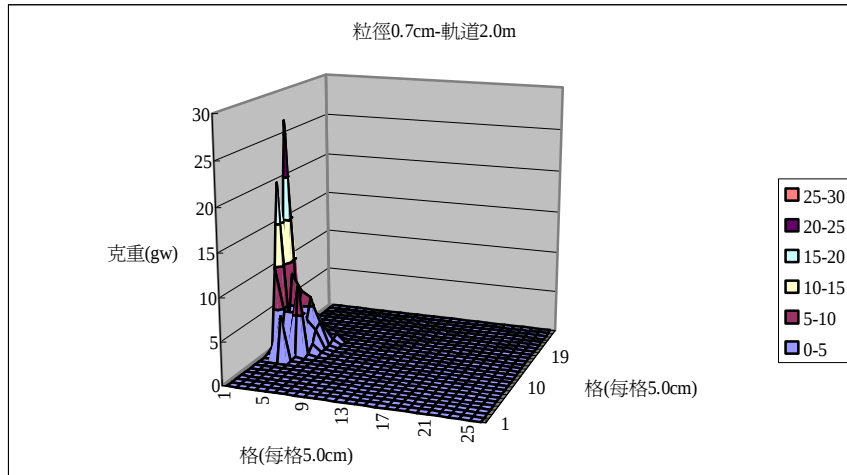




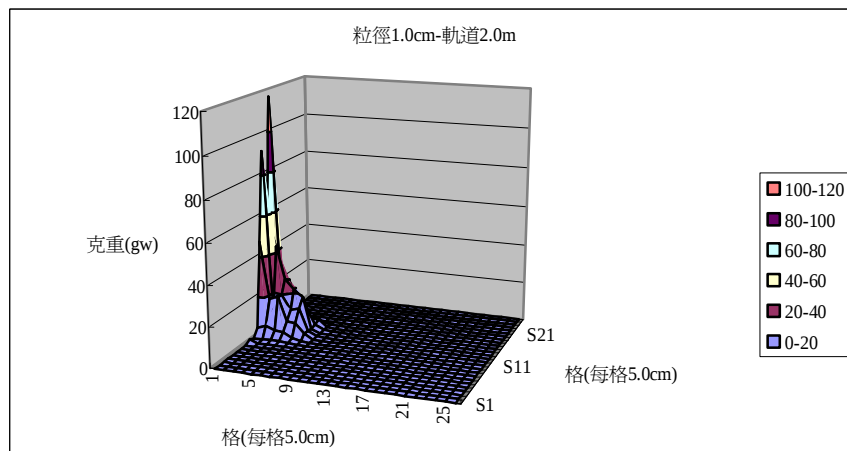
四、實驗四：含水與高嶺土之土石流混合體破壞力的分佈測量

(一)、五種礫石混合：軌道長：2.0m、高嶺土：1.0kg、水

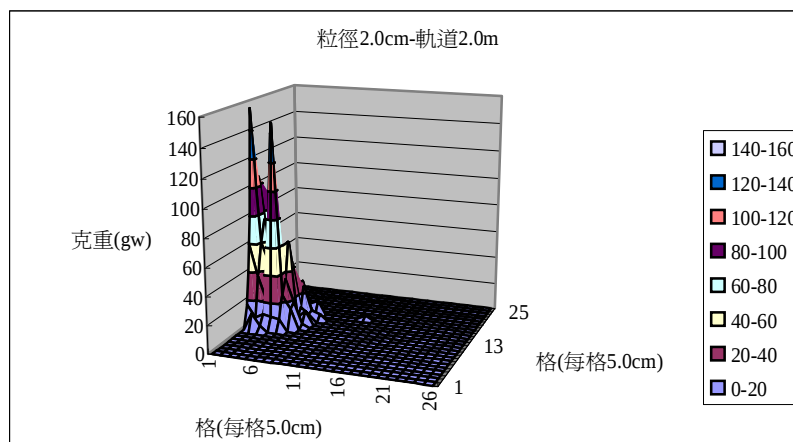
混合過後較沒有加水及高嶺土的堆積面積小很多，也明顯集中在軌道出口處。且在軌道上有明顯的堆積，



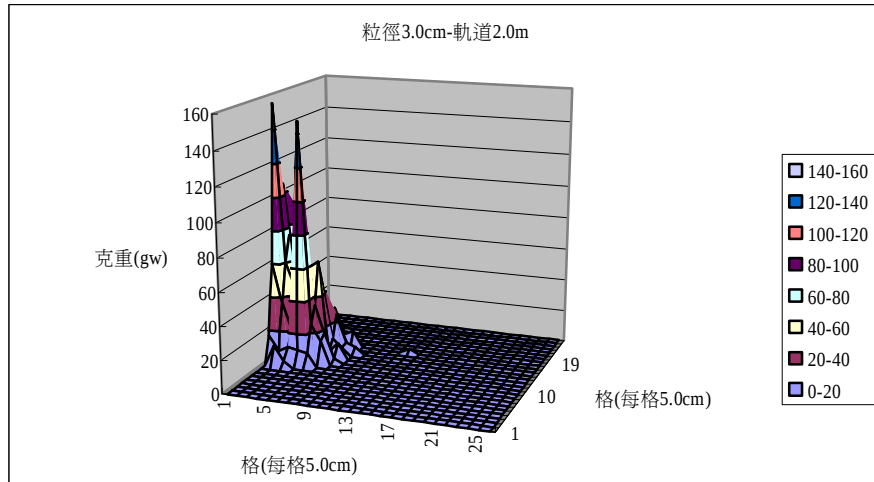
(圖二十一) 粒徑 0.7cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



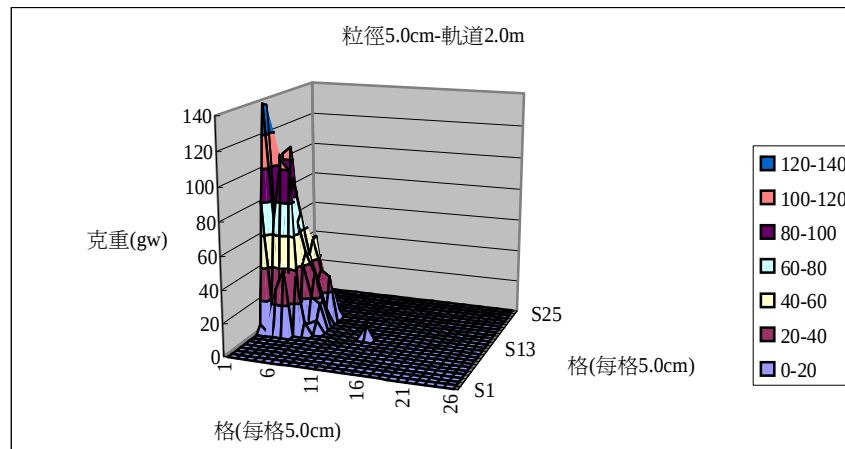
(圖二十二) 粒徑 1.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖二十三) 粒徑 2.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖二十四) 粒徑 3.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)



(圖二十五) 粒徑 5.0cm-軌道 2.0m 相同重量分布立體圖(左方為出口)

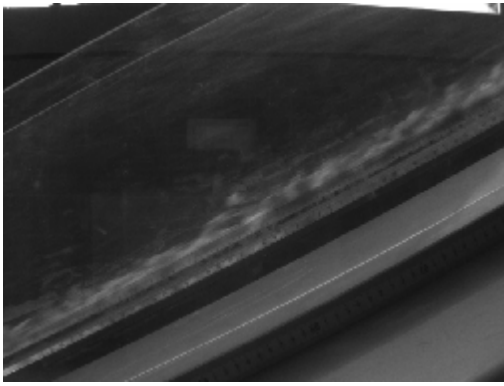


混合 2.0m 高嶺土+水 照片

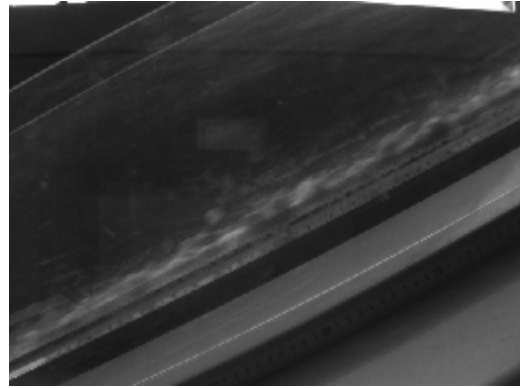


混合 2.0m 高嶺土+水 軌道堆積照片

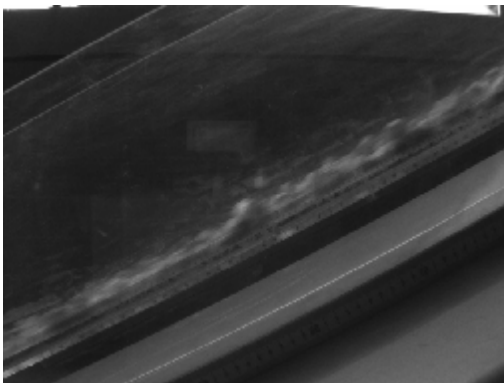
五、實驗五：乾燥礫石流模擬混合體流動過程的影像分析



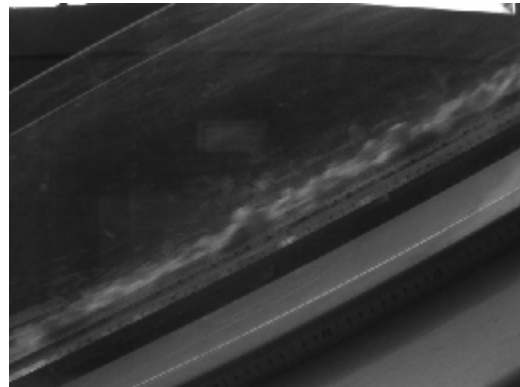
混合 2.0m-1



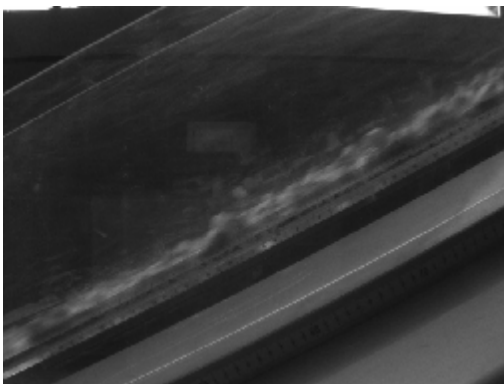
混合 2.0m-2



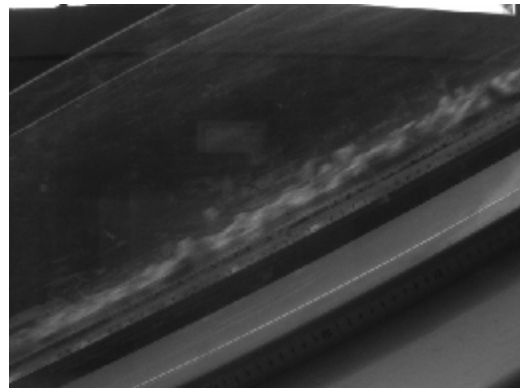
混合 2.0m-3



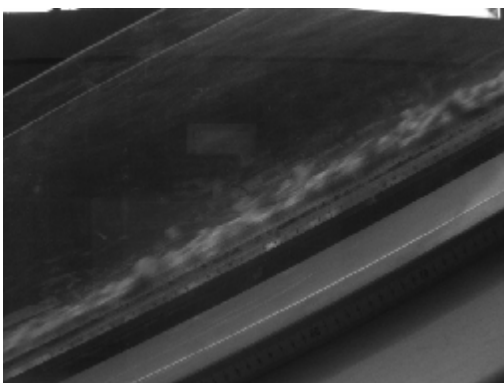
混合 2.0m-4



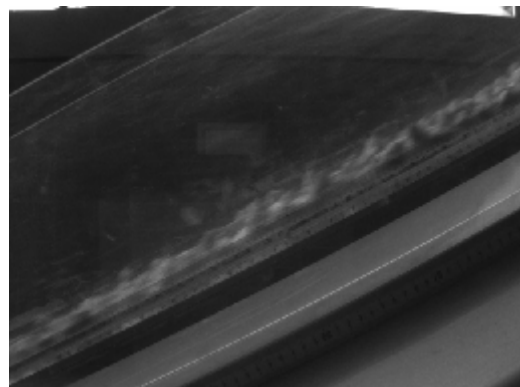
混合 2.0m-5



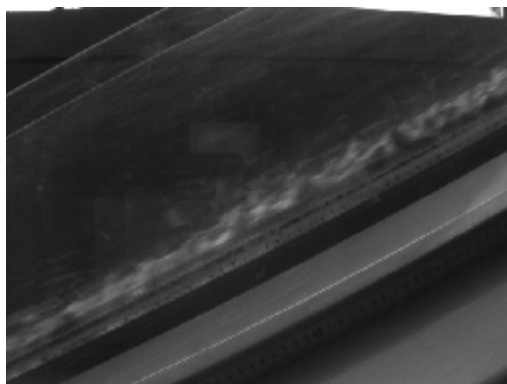
混合 2.0m-6



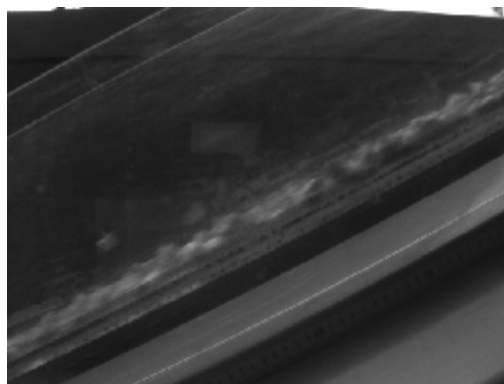
混合 2.0m-7



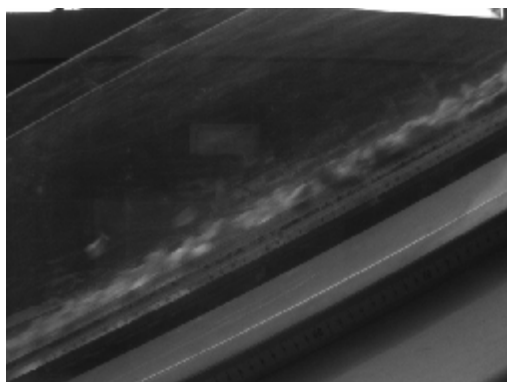
混合 2.0m-8



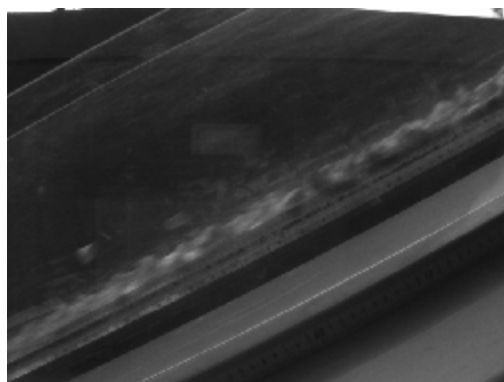
混合 2.0m-9



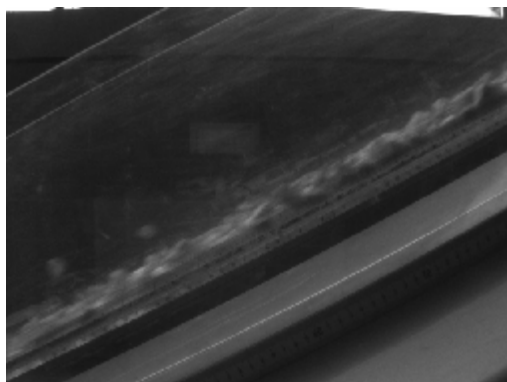
混合 2.0m-10



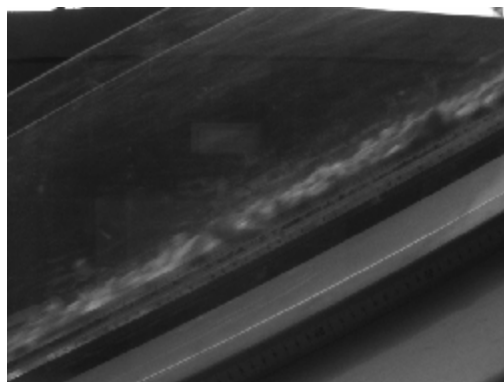
混合 2.0m-11



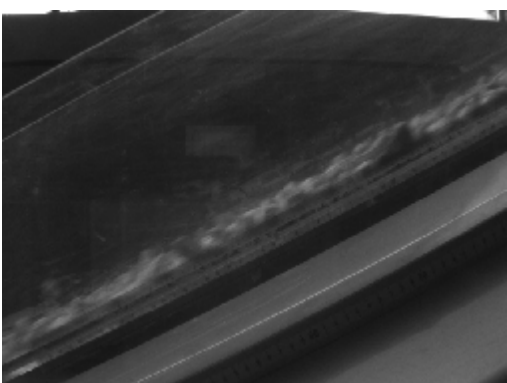
混合 2.0m-12



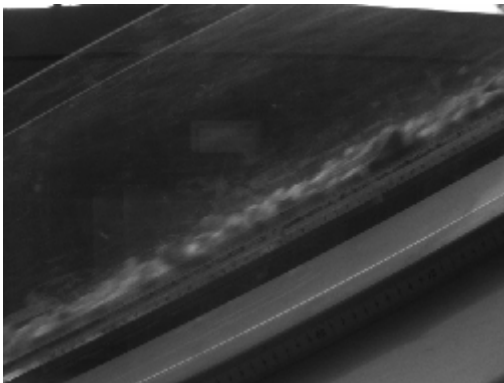
混合 2.0m-13



混合 2.0m-14

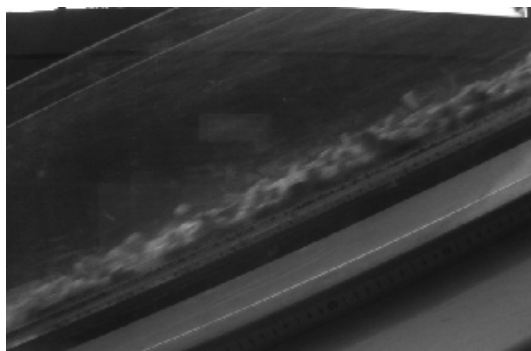


混合 2.0m-15

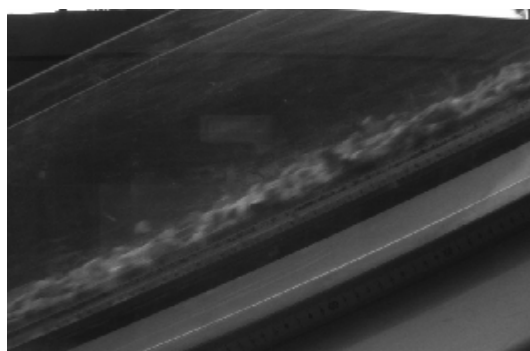


混合 2.0m-16

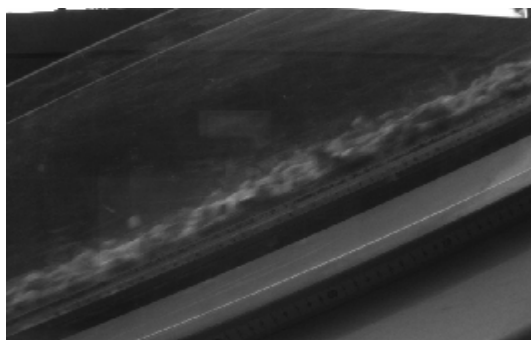
六、實驗六：含水與泥沙的土石流混合體流動過程的影像分析



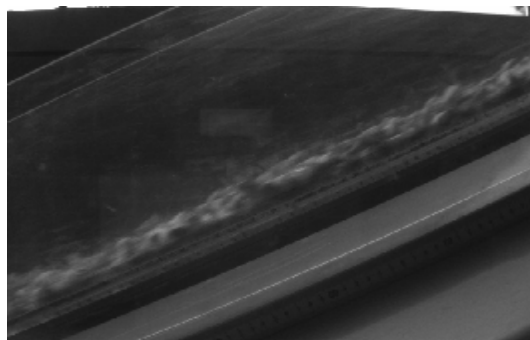
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -1



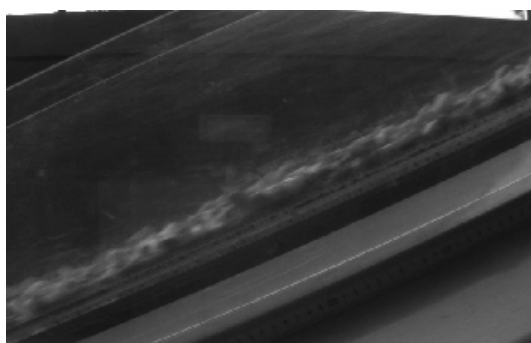
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -2



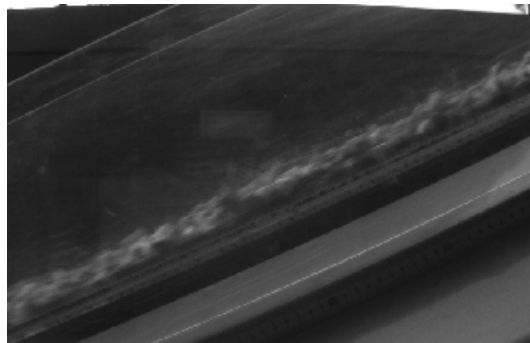
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -3



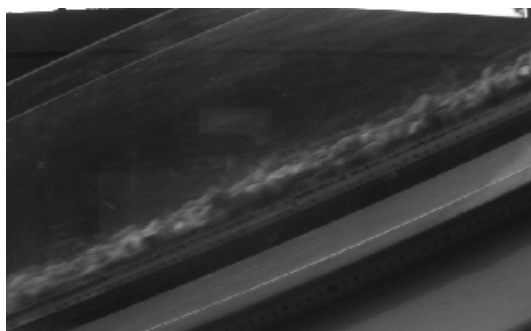
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -4



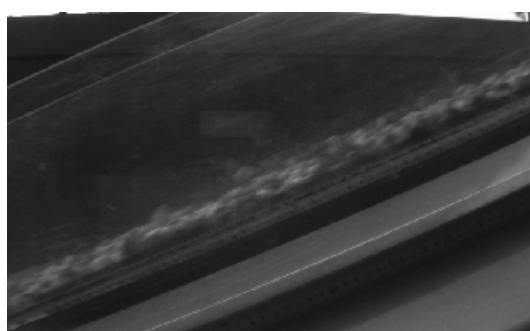
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -5



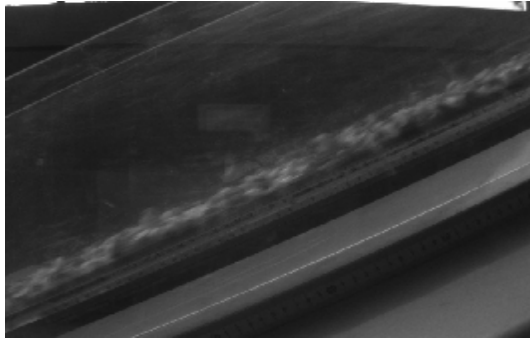
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -6



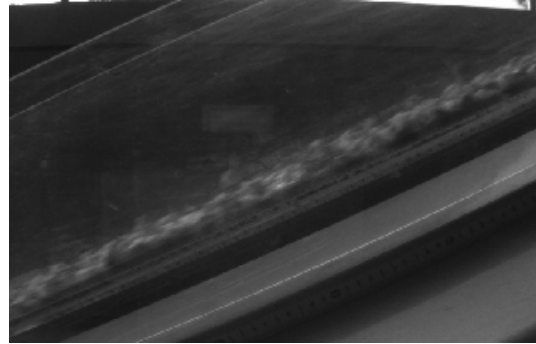
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -7



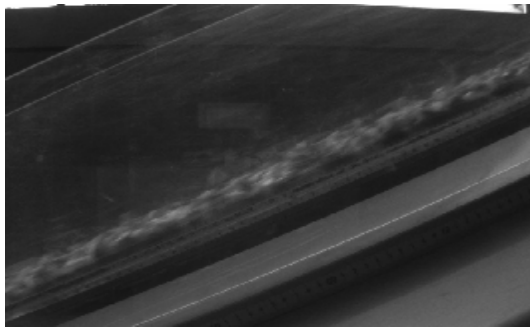
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -8



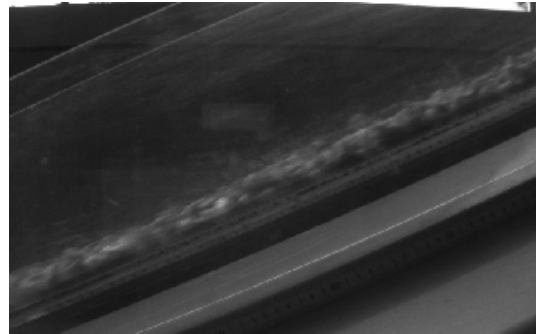
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -9



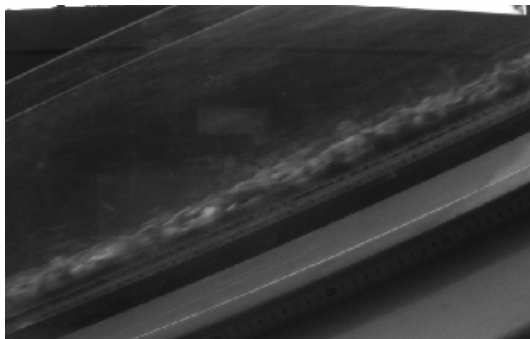
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -10



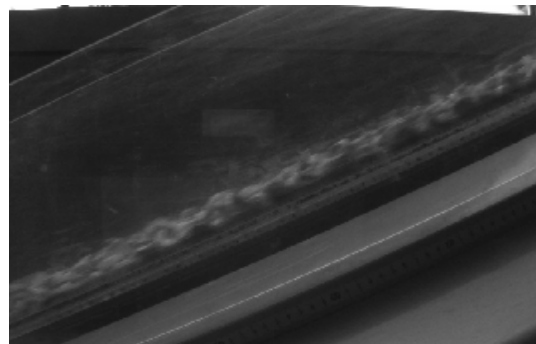
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -11



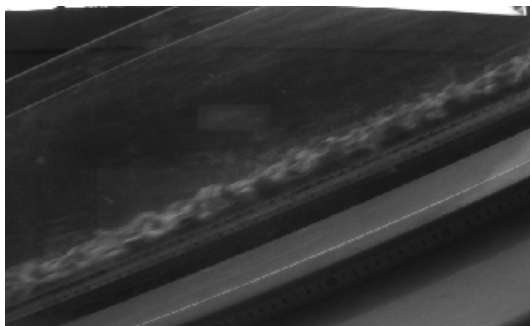
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -12



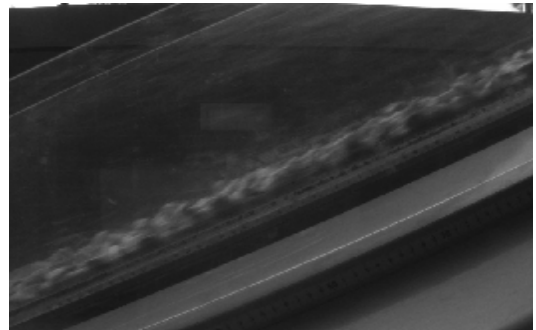
混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -13



混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -14



混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -15



混合 2.0m 高嶺土 1.0kg+水 -16

陸、討論

在土石流流動的過程當中，大石頭會因為小石頭的向上推擠而跑到土石流的頂端，使得小石頭在底下當軸承，讓土石流的破壞力更加強大。在這些實驗中，我們發現，高度越高大石頭所堆積距離軌道出口就越遠，大、小石頭的距離差也越大。顆粒流得現象也就更明顯。本研究有三個主要的理論可以提供研究結果的解釋：顆粒流、剪應力與分散力、黏滯性、土石流半經驗公式。

一、顆粒流與剪應力、分散力

當沙堆崩塌時，我們可以在表層看到如同液體一般流動的現象，而類似這樣的物質，例如：食鹽，糖，咖啡，滑石粉末，沙，煤我們一般都稱為『顆粒體』。顆粒體不但可以像固體一樣支撐重量和承受切變，也能像液體一樣流動。顆粒體之運動主要受到流體力學和摩擦力的行為所左右。因為摩擦力造成顆粒之間的碰撞是非彈性的碰撞，才會形成如此有趣的現象。

想像農夫將穀粒倒放入一個穀倉之中，他可能會發現倉底的壓力並不是隨著顆粒的不斷倒入而呈現線性增加。這是因為當穀粒倒入穀倉後，將有一部份的力將會傳遞到穀倉四周的牆壁。倉底的壓力和顆粒的堆積高度 h 有

$$\text{一個特定的關係： } P(h) \propto (1 - e^{-h/h_0})$$

這裡 h_0 是一個特徵長度。當 $h < h_0$ 時，壓力正比於堆積深度 h 。反之，當 $h \gg h_0$ 時，壓力將成為一個固定的值。在顆粒體間的壓力主要是透過附近顆粒之間的接觸而傳遞出去。由於顆粒和牆之間有摩擦力，所以重力可以被牆壁之摩擦力承受。這也就是為什麼穀倉並不像水壩一樣需要隨著深度的增加而逐漸加厚管壁。基本上穀倉的厚度大約都是一個固定的厚度。

當我們手拿一個半裝滿小圓珠的罐子，裡面摻了一個乒乓球。想要讓乒乓球升到所有小圓珠的頂端，我們只要搖晃或震動罐子，便會發現在搖動的過程，乒乓球將會逐漸地被推到表面，而小圓珠將會沈到底部。我們把這個分離現象叫做『巴西豆效應』。

二、土石流半經驗公式

$$\text{土石流半經驗公式： } F = 80.986 U^{1.2} R^2$$

(F:衝擊力，噸；流速，米/秒；R:巨石半徑，米)

依據這公式，當流速愈大時或石半徑愈大時都會使土石流具愈大的衝擊力。大的石頭應接受了較大的動量且具較大的衝擊力，所以當它撞到別的石頭或是底部時，理所當然會反彈到比較高的表層。

三、討論「比較個別乾燥礫石與混合時，礫石粒徑大小與破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因」

粒徑	重量集中範圍 (單一)	重量集中範圍 (混合)
0.7cm	(13,1)、(14,1)、(12,2)、(15,2)、(13,4)、(14,4)	(13,1)、(14,1)、(11,2)、(15,2)、(13,4)、(14,4)
1.0cm	(13,1)、(14,1)、(11,2)、(16,2)、(13,5)、(14,5)	(13,1)、(14,1)、(10,3)、(16,3)、(13,6)、(14,6)
2.0cm	(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,7)、(14,7)	(13,1)、(14,1)、(10,3)、(16,3)、(13,8)、(14,8)
3.0cm	(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,7)、(14,7)	(13,1)、(14,1)、(11,3)、(16,3)、(13,7)、(14,7)
5.0cm	(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,9)、(14,9)	(13,1)、(14,1)、(11,4)、(16,4)、(13,8)、(14,8)

礫石粒徑大小與破壞範圍關係表(軌道長 1.0m)

粒徑	重量集中範圍 (單一)	重量集中範圍 (混合)
0.7cm	(13,3)、(14,3)、(11,5)、(16,5)、(13,7)、(14,7)	(12,3)、(13,3)、(9,5)、(16,5)、(12,11)、(13,11)
1.0cm	(13,1)、(14,1)、(10,6)、(17,6)、(13,9)、(14,9)	(13,2)、(14,2)、(9,6)、(18,6)、(13,14)、(14,14)
2.0cm	(13,3)、(14,3)、(9,7)、(18,7)、(13,14)、(14,14)	(13,1)、(14,1)、(9,6)、(18,6)、(13,12)、(14,12)
3.0cm	(13,4)、(14,4)、(9,8)、(17,8)、(13,14)、(14,14)	(13,1)、(14,1)、(9,6)、(18,6)、(13,11)、(14,11)
5.0cm	(13,5)、(14,5)、(9,11)、(17,11)、(13,18)、(14,18)	(13,1)、(14,1)、(9,5)、(18,5)、(13,13)、(14,13)

礫石粒徑大小與破壞範圍關係表(軌道長 2.0m)

粒徑	重量集中範圍大小 (單一, 縱向*橫向) 1.0m/ 2.0m	重量集中範圍大小 (混合, 縱向*橫向) 1.0m/ 2.0m	形狀
0.7cm	15 cm *15cm / 20cm *25cm	15 cm *20cm / 40cm *35 cm	橢圓形
1.0cm	20 cm *25cm / 40cm *35cm	25 cm *30cm / 60cm *45 cm	
2.0cm	30 cm *25cm / 55cm *45cm	35 cm *30cm / 55cm *45 cm	
3.0cm	30 cm *25cm / 50cm *40cm	30 cm *25cm / 50cm *45 cm	
5.0cm	40 cm *25cm / 65cm *40cm	35 cm *25cm / 60cm *45 cm	

礫石粒徑大小與破壞範圍大小、分佈形狀關係表(軌道長 1.0m / 2.0m)

從個別與混合乾燥礫石比較粒徑分布，混合之後大小顆粒分佈比個別實驗時來得懸殊。此結果可解釋大小不同的粒石在群體的擠壓與碰撞的行為中，小顆粒因所承受的摩擦力比大顆粒多，而在單獨測量時則無不同粒徑間的交互影響。

四、討論「路徑長 L 對土石流破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因」

粒徑	重量集中距道出口距離 (單一) 1.0m/ 2.0m	重量集中距軌道出口距離 (混合) 1.0m/ 2.0m
0.7cm	0cm / 10cm	0cm / 10cm
1.0cm	0cm / 0cm	0cm / 5cm
2.0cm	0cm / 10cm	0cm / 0cm

3.0cm	0cm / 15cm	0cm / 0cm
5.0cm	0cm / 20cm	0cm / 0cm

軌道長短與重量集中區距道出口距離關係表(軌道長 1.0m / 2.0m)

隨著粒徑的增加，礫石的破壞範圍也跟著變大，其破壞範圍大約成橢圓形，其中橢圓形的縱向長度皆大於橫向長度。軌道滑下的起始長度越長，表示大自然供給土石流的動能與動量越大，破壞範圍也會隨著軌道長的增加而整個向前移動。

五、討論「含水量的多寡對土石流破壞範圍、分佈形狀、破壞程度的關係與成因」

	縱向長度	橫向長度	最大高度	縱向坡度 $\tan\theta$ 值	橫向坡度 $\tan\theta$ 值	分布形狀
礫石乾燥混合	122.5 cm	72.5 cm	7.5cm	7.5 / 50=0.15	7.5 / 30=0.25	扇型
礫石加水(4.0kg)混合	52.5 cm	55.0cm	6.5cm	6.5 / 32.5=0.2	6.5 / 27.5=0.24	橢圓形
礫石加水(8.0kg)混合	45.0 cm	80.0 cm	4.0cm	4.0 / 20.0=0.2	4.0 / 40.0=0.1	
礫石加水(4.0kg)、泥土混合	40.0 cm	42.5 cm	10.4cm	10.4 / 40=0.26	10.4 / 32.5=0.32	

含水量的多寡與重量集中區、分布形狀的關係圖(軌道長 2.0m)

觀察與測量礫石堆積的形狀，大致上呈不同程度的扇形或橢圓形，隨著加水後，破壞範圍變小，但橫向與縱向的坡度變大；加水與加泥後破壞範圍縮更小，而堆積的最大高度增為乾燥時的 1.5 倍，橫向與縱向坡度均增加。此乃可用水對剪應力的強弱分散特性來解釋，所以由乾燥加水時，縱向、橫向長度與高度均變小，當水量增加時，會增加橫向的長度。而加泥之後，則增加混合體的黏滯性，黏滯性增加時，動量會受阻而減少，對大顆粒的影響較大，使得大顆粒無法大量的移至上層。

六、討論「混合體中各種成分與不同粒徑礫石分佈的變化及成因」

單單只有混合的乾燥石頭的破壞範圍較有加水與高嶺土的混合石頭廣泛，且其重量集中的分布形狀也有很大的差異。混合的乾燥石頭其重量集中的分布形狀多半是縱向長度大於橫向長度的橢圓形，而有加水與高嶺土的混合石頭重量集中的分布形狀大部分是屬於縱向長度小於橫向長度的橢圓形。不過可以從這些表格當中看出，不論是乾燥的石頭，或是加水和高嶺土的土石流，不同粒徑的分布範圍皆是大石頭比小石頭還要來的廣泛，但加了水和高嶺土的土石流，每種粒徑石頭的分佈範圍皆大幅縮小，尤其是粒徑較大的石頭更為明顯。不僅如此，堆積的最大高度也會增加。

堆積體坡度比較表

	縱向長度	橫向長度	最大高度	縱向坡度 $\tan\theta$ 值	橫向坡度 $\tan\theta$ 值
實驗二-2	55.0 cm	82.5 cm	2.0 cm	2.0 / 42.5 = 0.047	2.0 / 35.0 = 0.057
實驗三-2	40.0 cm	42.5 cm	10.4 cm	10.4 / 40 = 0.26	10.4 / 32.5 = 0.32

	縱向長度	橫向長度	最大高度	縱向坡度 $\tan\theta$ 值	橫向坡度 $\tan\theta$ 值	分布形狀
礫石乾燥混合	122.5 cm	72.5 cm	7.5cm	7.5 / 50=0.15	7.5 / 30=0.25	扇型
礫石加水(4.0kg)混合	52.5 cm	55.0cm	6.5cm	6.5 / 32.5=0.2	6.5 / 27.5=0.24	橢圓形
礫石加水(8.0kg)混合	45.0 cm	80.0 cm	4.0cm	4.0 / 20.0=0.2	4.0 / 40.0=0.1	
礫石加水(4.0kg)、泥土混合	40.0 cm	42.5 cm	10.4cm	10.4 / 40=0.26	10.4 / 32.5=0.32	

堆積最多點距軌道出口比較表

測量項目 \ 粒徑	0.7cm	1.0cm	2.0cm	3.0cm	5.0cm
實驗一-1	5	0	0	0	0
實驗一-2	15	20	20	30	30
實驗二-1	0	0	5	5	5
實驗二-2	20	20	15	10	10
實驗三-1	60	60	70	60	70
實驗三-2	110	115	115	110	115
實驗四-2	0	0	0	0	0

堆積範圍和面積(長*寬)比較表

測量項目 粒徑	0.7cm	1.0cm	2.0cm	3.0cm	5.0cm
個別測量 軌道長：1.0m 水：無 高嶺土：無	(13,1)、(14,1)、 (12,2)、(15,2)、 (13,4)、(14,4) 20*20	(13,1)、(14,1)、 (11,2)、(16,2)、 (13,5)、(14,5) 25*30	(13,1)、(14,1)、 (11,4)、(16,4)、 (13,7)、(14,7) 35*30	(13,1)、(14,1)、 (11,4)、(16,4)、 (13,7)、(14,7) 35*30	(13,1)、(14,1)、 (11,4)、(16,4)、 (13,9)、(14,9) 45*30
個別測量 軌道長：2.0m 水：無 高嶺土：無	(13,3)、(14,3)、 (11,5)、(16,5)、 (13,7)、(14,7) 25*30	(13,1)、(14,1)、 (10,6)、(17,6)、 (13,9)、(14,9) 45*40	(13,3)、(14,3)、 (9,7)、(18,7)、 (13,14)、(14,14) 60*50	(13,4)、(14,4)、 (9,8)、(17,8)、 (13,14)、(14,14) 55*45	(13,5)、(14,5)、 (9,11)、 (17,11)、 (13,18)、(14,18) 70*45
礫石混合 軌道長：1.0m 水：無 高嶺土：無	(13,1)、(14,1)、 (11,2)、(15,2)、 (13,4)、(14,4) 20*25	(13,1)、(14,1)、 (10,3)、(16,3)、 (13,6)、(14,6) 30*35	(13,1)、(14,1)、 (10,3)、(16,3)、 (13,8)、(14,8) 40*35	(13,1)、(14,1)、 (11,3)、(16,3)、 (13,7)、(14,7) 35*30	(13,1)、(14,1)、 (11,4)、(16,4)、 (13,8)、(14,8) 40*30
礫石混合 軌道長：2.0m 水：無 高嶺土：無	(12,3)、(13,3)、 (9,5)、(16,5)、 (12,11)、(13,11) 45*40	(13,2)、(14,2)、 (9,6)、(18,6)、 (13,14)、(14,14) 65*50	(13,1)、(14,1)、 (9,6)、(18,6)、 (13,12)、(14,12) 60*50	(13,1)、(14,1)、 (9,6)、(18,6)、 (13,11)、(14,11) 55*50	(13,1)、(14,1)、 (9,5)、(18,5)、 (13,13)、(14,13) 65*50
礫石混合 軌道長：1.0m 水：4.0kg 高嶺土：無	(13,10)、(14,10)、 (9,12)、(18,12)、 (13,16)、(14,16) 35*50	13,10)、(14,10)、 (7,10)、(19,11)、 ((13,19)、(14,19) 50*65	(12,11)、 (13,11)、(8,12)、 (18,12)、 (13,19)、(14,19) 45*55	(13,12)、 (14,12)、 (8,15)、 (19,13)、 (13,22)、(14,22) 55*60	(6,13)、 (20,14)、 (13,15)、 (14,15)、 (13,23)、(14,23) 45*80
礫石混合 軌道長：2.0m 水：4.0kg 高嶺土：無	(13,21)、(14,21)、 (7,24)、(17,24)、 (13,26)、(14,26) 30*55	(13,20)、(14,20)、 (7,23)、(20,21)、 (13,26)、(14,26) 35*65	(13,23)、 (14,23)、 (7,24)、 (18,24)、 (13,26)、(14,26) 20*65	(13,23)、 (14,23)、 (6,24)、 (20,24)、 (13,25)、(14,25) 15*65	(13,23)、 (14,23)、 (6,23)、 (21,24)、 (13,25)、(14,25) 15*80
礫石混合 軌道長：2.0m 水：4.0kg 高嶺土：1.0kg	(13,1)、(14,1)、 (11,3)、(16,3)、 (13,5)、(14,5) 25*30	(13,1)、(14,1)、 (11,3)、(17,3)、 (13,6)、(14,6) 30*35	(13,3)、(14,3)、 (9,7)、(18,7)、 (13,14)、(14,14) 60*50	(13,4)、(14,4)、 (10,4)、(17,4)、 (13,7)、(14,7) 20*40	(13,1)、(14,1)、 (9,3)、(18,3)、 (13,7)、(14,7) 40*50

堆積範圍離軌道最遠座標比較表

測量項目 粒徑	0.7cm	1.0cm	2.0cm	3.0cm	5.0cm
個別、乾燥、 軌道長 1.0m	(6,25) 、(6,20) 、 (18,20)	(15,26) 、 (15,24) 、(16,20)	(9,26) 、(8,18) 、 (12,18)	(11,13) 、(13,13) 、(17,13)	(14,16) 、 (12,18) 、(23,18)
個別、乾燥、 軌道長 1.0m	(5,26) 、 (10,26) 、(25,26)	(8,24) 、(9,26) 、 (13,26)	(1,24) 、(13,25) 、 (24,26)	(10,22) 、(7,22) 、(19,23)	(12,25) 、 (14,26) 、(16,25)
混合、乾燥、 軌道長 1.0m	(20,26) 、 (19,21) 、(20,19)	(19,26) 、 (18,24) 、(15,23)	(13,15) 、(16,15) 、 (19,15)	(13,12) 、(15,11) 、(13,10)	(17,21) 、(13,19)
混合、乾燥、 軌道長 2.0m	(7,24) 、 (14,24) 、(25,26)	(12,26) 、 (17,26) 、(19,25)	(14,25) 、(12,21) 、 (14,21)	(6,24) 、(11,24) 、(14,21)	(12,19) 、 (12,20) 、(15,20)
混合、水 4.0kg、軌道 1.0m	(11,26) 、 (12,26) 、(14,26)	(12,26) 、 (13,26) 、(16,26)	(13,26) 、(14,26) 、 (16,26)	(15,26) 、(15,25) 、(13,25)	(12,24) 、 (13,24) 、(14,24)
混合、水 4.0kg、2.0m	(7,26) 、 (11,26) 、(13,26)	(12,26) 、 (14,26) 、(16,26)	(9,26) 、(12,26) 、 (17,26)	(7,26) 、(9,26) 、(10,26)	(7,26) 、 (18,26) 、(19,26)
混、水 4.0kg 、 2.0m、± 1.0kg	(10,17) 、 (26,11) 、(15,9)	(14,8) 、(15,8) 、 (17,9)	(10,16) 、(2,13) 、 (17,13)	(17,13) 、(26,10) 、(15,8)	(11,13) 、 (13,7) 、(15,7)

堆積集中範圍比較表

測量項目 粒徑	0.7cm	1.0cm	2.0cm	3.0cm	5.0cm
個別、乾燥、 軌道長 1.0m	(12,2)、(13,1)、 (13,2)、(14,2)、 (13,3)	(12,1)、(13,1)、 (14,1)、(15,1)、 (12,2)	(12,1)、(13,1)、 (14,1)、(15,1)、 (13,2)	(12,1)、(13,1)、 (14,1)、(15,1)、 (14,2)	(12,2)、(13,1)、 (14,1)、(15,1)、 (13,3)
個別、乾燥、 軌道長 1.0m	(12,4)、(13,4)、 (14,4)、(13,5)、 (14,5)	(13,6)、(14,6)、 (15,6)、(13,7)、 (14,7)	(13,4)、(13,5)、 (13,6)、(13,7)、 (14,5)	(13,6)、(14,5)、 (14,6)、(14,7)、 (15,6)	(12,7)、(13,6)、 (13,8)、(13,9)、 (14,9)
混合、乾燥、 軌道長 1.0m	(12,1)、(13,1)、 (13,2)、(14,1)、 (15,1)	(12,1)、(13,1)、 (13,2)、(14,1)、 (15,1)	(12,1)、(12,2)、 (13,2)、(14,1)、 (15,1)	(12,1)、(12,2)、 (14,1)、(14,2)、 (15,1)	(11,1)、(11,2)、 (12,2)、(12,3)、 (15,1)
混合、乾燥、 軌道長 2.0m	(10,4)、(12,6)、 (13,5)、(13,6)、 (14,6)	(12,6)、(13,5)、 (13,6)、(14,5)、 (14,6)	(12,4)、(13,4)、 (13,5)、(13,6)、 (14,8)	(11,6)、(13,3)、 (13,5)、(13,6)、 (15,3)	(15,1)、(15,3)、 (15,4)、(14,4)、 (12,5)
礫石混合 軌道長：1.0m 水：4.0kg 高嶺土：無	(12,12)、 (13,10)、 (13,11)、 (14,11)、(14,12)	(12,13)、 (12,14)、 (12,15)、 (13,16)、(15,13)	(11,15)、 (12,14)、 (12,15)、 (13,16)、(15,13)	(9,14)、 (10,13)、 (10,12)、 (16,13)、(15,16)	(9,15)、 (13,15)、 (9,16)、 (12,16)、(10,17)
礫石混合 軌道長：2.0m 水：4.0kg 高嶺土：無	(9,24)、(10,24)、 (10,25)、 (13,23)、(14,23)	(14,24)、 (12,25)、 (11,24)、 (10,24)、(11,25)	(10,24)、 (12,24)、 (13,24)、 (14,24)、(16,25)	(11,25)、 (18,24)、 (7,23)、 (16,23)、(17,23)	(6,25)、 (18,26)、 (15,24)、 (19,26)、()
礫石混合 軌道長：2.0m 水：4.0kg 高嶺土：1.0kg	(12,1)、(13,1)、 (14,1)、(14,2)、 (15,1)	(12,1)、(12,2)、 (13,1)、(14,1)、 (14,2)	(12,1)、(13,1)、 (13,2)、(14,2)、 (14,3)	(12,1)、(13,1)、 (14,1)、(15,1)、 (13,2)	(11,1)、(12,1)、 (13,1)、(13,2)、 (16,1)

柒、結論

本研究有三個主要的理論可以提供研究結果的解釋：顆粒流、剪應力與分散力、黏滯性、土石流半經驗公式。而研究的結論主要有五：

- 一、實驗一：軌道越長，礫石所堆積的範圍就越大，堆積區離軌道出口的距離也越大。且大石頭比小石頭堆積的範圍大。
- 二、實驗二：隨著粒徑越大，分布範圍越大，且大石頭所堆積的距離比小石頭遠。
- 三、實驗三：因為加入高嶺土和水的關係，土石分佈範圍大幅所小。與不加水和

高嶺土的情況大不相同。因為固體顆粒之間的剪應力會將彼此之間的作用力分散，因此堆積形狀為放射狀扇型，當加入水與高嶺土後，顆粒之間的作用力不能分散而造成堆積形狀為橢圓形。

四、流動圖：因大石與小石相撞時的作用力與反作用力，流動時有稍微的波動現象。且在本過程中，小石會漸漸往下跑(巴西豆效應)，變為軸承，可以明顯看出大石頭在上，小石頭在下。且上層礫石的速度比下層礫石快的多，此現象為顆粒流的特性之一。

捌、參考文獻及其他：

- 一、周東寬，二維斜坡顆粒流之輸送帶實驗與分析，2003 年國立中央大學土木所碩士論文。
- 二、周乘雨，剪力流中液體含量對混合機制的影響，2005 年國立中央大學機工所碩士論文。
- 三、陳樹群，土石流防災知多少，科學發展月刊，2004 年 2 月，374 期，第 24 至 33 頁。
- 四、陳文福，陳有蘭溪集水區之地形特性與土地利用之關係，1998 年，19 期(2)，第 137 至 155 頁。
- 五、許智淵，粉粒體內摩擦係數對剪力顆粒流輸送性質之影響，2004 年國立中央大學機工所碩士論文。
- 六、彭子軒，慢顆粒流之輸送帶實驗與影像分析，2002 年國立中央大學土木所碩士論文。
- 七、游繁結、陳重光，豐丘土石流災害之探討，中華水土保持學報，1998 年，18 期(1)，第 76 至 92 頁。
- 八、楊文龍，顆粒剪力流體之傳輸現象探討，2005 年國立中央大學機工所博士論文。
- 九、詹錢登，豪雨造成的土石流，科學發展月刊，2004 年 2 月，374 期，第 14 至 23 頁。
- 十、賈魯強 黎壁賢，漫談顆粒體物理，物理雙月刊，2001 年 8 月，23 卷 4 期，第 503 至 510 頁。
- 十一、蔡長泰，洪水與土石流，科學發展月刊，2004 年 2 月，374 期，第 4 至 5 頁。
- 十二、Hunger, O. and Morgan, G. C. and Kellerhals, R. (1984), "Quantitative Analysis of Debris Torrent Hazards for Design of Remedial Measures" Can. Geotech. J., Vol. 21, pp.663-667.

【評 語】 040507 土石流的流動之謎

1. 實驗數據配合理論及半經驗公式討論土石流流動現象，合乎科學研究過程。
2. 模擬與實際狀況之間的可能差異討論比較不夠；這部份與結論有密切關係。